

Wpływ rodzaju cementu na właściwości BWW z kruszywa bazaltowego

Influence of the type of cement on properties of high-performance concretes produced using basalt aggregate

1. Wstęp

Beton wysokiej wartościowości powinien przede wszystkim posiadać dużą trwałość, zapewniającą spełnianie przez konstrukcję założonych w projekcie funkcji. Równocześnie zwyczajowo wykazuje on dużą wytrzymałość, średnia jej wartość powinna przekraczać 60 MPa. Wytrzymałość nie jest więc wyłącznym wyróżnikiem tego betonu, jednak łączy się ona z porowatością, a więc i przepuszczalnością betonu, a ta właściwość ma już bardzo ścisły związek z odpornością tego kompozytu na oddziaływania korozyjne i jego trwałość.

Przy projektowaniu BWW niezwykle ważne znaczenie ma staranny dobór składników (1). Szczególnie rodzaj i właściwości cementu mają krytyczne znaczenie, a z właściwości na pierwsze miejsce Aitcin (1) wysuwa reologię i wytrzymałość. Tę ostatnią jeżeli celem jest BWW dużej klasy.

Równie duże znaczenie ma kruszywo. Zwykle przyjmowało się, że pęknięcia w betonie biegną w matrycy cementowej, omijając kruszywo. Jednak w betonach o dużej wytrzymałości, jak to wykazali już w roku 1981 Zaitsev i Wittmann (2), pęknięcia biegną co najmniej częściowo przez ziarna kruszywa. W obecnie wytwarzanych betonach o dużej wytrzymałości jest dodatkowo z reguły wzmocniona strefa przejściowa kruszywo-matryca przez dodatek pyłów krzemionkowych, co dodatkowo potęguje znaczenie właściwości fizycznych kruszywa. Wytrzymałość kruszywa odgrywa więc dużą rolę w wytwarzaniu BWW, bowiem ten składnik może stać się ogniwem o najsłabszej wytrzymałości (1).

Neville (3) w swojej monografii na temat właściwości betonu omawia krótko znaczenie jakości kruszywa w betonie o bardzo dużej wytrzymałości. Stwierdza on, że wytrzymałość ziaren kruszywa grubego może być w tym przypadku rozstrzygająca. Stwierdza również, że duże ziarna kruszywa są niepożądane, ponieważ wprowadzają znaczne zróżnicowanie do układu i może zaznaczyć się niezgodność właściwości na granicy kruszywo - matryca cementowa, szczególnie w zakresie współczynnika sprężystości, skurczu i pęcznienia (3). Z tego względu zaleca aby aby maksymalny wymiar kruszywa

1. Introduction

High-Performance Concrete (HPC) should, first of all, possess high durability assuring performance of functions assumed in the design of the structure. At the same time, it generally shows high strength; its average value should exceed 60 MPa. The strength is not the only attribute of this concrete, however, it is the function of porosity and, as a consequence with the permeability of concrete and that characteristic is in turn very closely linked to with resistance of this composite to corrosive agents and thus with durability.

In designing of HPC careful selection of components is of paramount importance (1). In particular, the type and characteristics of cement are of critical importance; among characteristics Aitcin (1) positions rheology and strength at the top. The later one is on the first place if the aim is to obtain high class HPC.

The aggregate is of equal importance. It was usually assumed that microcracks in concrete run within the cement matrix bypassing the aggregate. However, in high resistance concretes, as presented already in 1981 by Zaitsev and Wittmann (2), the microcracks run, at least partly, through the grains of aggregate. In currently manufactured high resistance concretes the transition zone aggregate-matrix is generally additionally strengthened by addition of silica fume, which increases the importance of physical properties of the aggregate. As a consequence strength of the aggregate plays an important role in manufacturing of HPCs as that component can prove to be the lowest strength one (1).

Neville (3) in his study of concrete characteristics discusses shortly the importance of aggregate quality in very high strength concrete. He states that the strength of coarse aggregate grains can be the decisive factor. He also states that large aggregate grains are undesirable because they introduce high differentiation into the system and incompatibility of properties can appear at the transition zone: aggregate and cement matrix, in particular as concerns the coefficients of elasticity, shrinkage and creep (3). For those reasons it is recommended that the maximum aggregate size should not exceed 10 to 12 mm (3).

nie przekraczać 10 lub 12 mm (3).

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI CEMENTÓW

CHARACTERISTICS OF CEMENTS

Znacznie więcej miejsca właściwościom kruszywa poświęca Aitcin (1) w swojej monografii poświęconej BWW. Podaje on, że

Właściwość/ Characteristic	CEM I 42,5 N HSR NA	CEM II/B-V 32,5 R HSR
Powierzchnia/Surface, m ² /kg	3100	3900
Wytrzymałość/Strength, MPa	2 dni/days: 20 28 dni/days: 44,8	2 dni/days: 16 28 dni/days: 50,2
Wodożądność/Water demand, %	21	27
Ciepło hydratacji/ Hydration heat, J/g*	152	164

Uwaga: * według EN-PN 196-9

Notice: * according to EN-PN 196-9

Podaje on, że kruszywa uzyskane ze skał magmowych i wymienia na pierwszym miejscu granit, następnie sjenit, a dalej dioryt i gabbro. Aitcin (1) podkreśla także, że kruszywo powinno mieć kształt kulisty, a niepożądane są ziarna płaskie i wydłużone. Kruszywa o takich kształtach są często słabe i pogarszają urabialność betonu. Aitcin (1) porusza także zagadnienie wymiaru kruszywa grubego. Podobnie jak Neville uważa, że zbyt duży wymiar kruszywa nie jest korzystny (1). W przypadku dużych wymiarów kruszywa strefa przejściowa jest niejednorodna. Ponadto kruszywo drobne ma większą wytrzymałość bowiem w procesie rozdrabniania zostały wyeliminowane makrodefekty, takie jak mikrospeknięcia i duże pory. Z tych wszystkich względów zalecany wymiar maksymalny kruszywa powinien zawierać się w przedziale 10–12 mm. Jednak gdy materiał skalny ma dużą wytrzymałość i jednorodność można stosować nawet frakcję 20–25 mm nie powodując pogorszenia urabialności i wytrzymałości betonu (1).

Aitcin i Mehta (4) badali znaczenie składu mineralnego kruszywa grubego i stwierdzili, ku ich zaskoczeniu, że w przypadku kruszywa diorytowego i kalcytowego beton osiągnął lepszą wytrzymałość, prawdopodobnie w skutek słabszej strefy przejściowej.

Grodzicka (5) podaje, że wytrzymałość kruszyw do wytwarzania BWW powinna być większa od 150 MPa, a nasiąkliwość mniejsza od 0,5%. Zwraca także uwagę na zawartość pyłów, która nie powinna przekraczać 0,6% w przypadku kruszywa granitowego, a 0,8% dla sjenitu.

W niniejszej pracy opisano właściwości BWW otrzymanego z dwóch cementów o bardzo różniących się właściwościach. Jako kruszywo zastosowano bazalt z kopalni Targowica koło Strzelina, którego skład mineralny opisano we wcześniejszej pracy (6). Celem tych badań było zbadanie wpływu rodzaju cementu na właściwości BWW oraz znaczenie kruszywa bazaltowego o bardzo dobrych właściwościach.

2. Materiały

Do wykonania betonów zastosowano dwa cementy: CEM I 42,5 N HSR NA oraz CEM II/B-V 32,5 R. Właściwości tych cementów podano w tablicy 1. Oba cementy należały do grupy cementów specjalnych, odpornych na siarczany. Dodatkowo CEM I zawierał mało alkaliów, to jest ekwiwalent sodowy był mniejszy od 0,6%.

Aitcin (1) devotees much more space to properties of aggregates in his monographic work on HPC. He specifies that the aggregates should be those obtained from magmatic rocks. He ranks them starting

with granite on top followed by syenite and then diorite and gabbro. He also stresses that the aggregates should be spherical in shape while flat or elongated grains are undesirable. Aggregates of those shapes are frequently weak and deteriorate workability of concrete. Aitcin (1) also mentions the issue of coarse aggregate size. Similar to Neville he states that excessively large size of aggregate is unfavorable (1). In case of large size aggregate the transition zone is not homogenous. Additionally, fine aggregate has higher strength as in the process of production macrodefects such as micro-cracks and large pores have been eliminated. For all those reasons, the recommended maximum aggregate grain size should range within 10–12 mm. However, when the rock material is highly strong and uniform, even the fractions 20–25 mm can be used without deterioration of workability and strength of concrete (1).

Aitcin and Mehta (4) studied the importance of mineral composition of coarse aggregate and concluded, to their surprise, that in case of diorite and calcite aggregates the concrete achieved better strength, probably as a consequence of weaker transition zone – granite-cement matrix.

Grodzicka (5) reports that the strength of aggregates for HPC production should exceed 150 MPa, and the absorbability should be lower than 0,5%. She also draws attention to the content of dust, which should not exceed 0,6% in case of granite aggregate and 0,8% for syenite.

This paper presents characteristics of HPC obtained from two cements possessing highly different characteristics. Basalt from Targowica quarry near Strzelin the mineral composition of which was described in an earlier paper (6) was employed as aggregate. The study aimed at investigating the influence of cement type on HPC characteristics and the importance of basalt aggregate, possessing very good properties.

2. Materials

The concretes were manufactured using two types of cement: CEM I 42,5 N HSR NA and CEM II/B-V 32,5 R. The characteristics of those cements are presented in Table 1. Both cements belonged to the group of special cements with high resistant to sulfates. Additionally, CEM I contained little alkalis, i.e. the sodium

SKŁAD BETONÓW

COMPOSITION OF CONCRETES

Składnik / Component	kg/m ³
Cement*	400
Kruszywo / Aggregate 8/12,8	434
Kruszywo / Aggregate 5/8	853
Kruszywo / Aggregate 0/5	368
Piasek / Sand 0/2	461
Woda / Water w/c 0,34	136
Domieszka Viscocrete / Addition of Viscocrete 3**	3,2**

Uwagi: * Beton 1 - cement CEMI 42,5 N, beton 2 - cement CEMII/B-V
 ** W przypadku betonu 1 0,76 m.c. (3,04 kg), a betonu 2 0,8 m.c.(3,2 kg).

Notice: * Concrete 1 - cement CEMI 42,5 N, concrete 2 - cement CEMII/B-V

** In case of concrete 1 0,76 m.c. (3,04 kg), and concrete 2 0,8 m.c. (3,2 kg).

Cement CEM II/B-V miał większą wodożądność ze względu na większą powierzchnię właściwą. Z kolei wykazywał on mniejsze ciepło hydratacji. Wytrzymałość obu cementów była wysoka; większa dla cementu bez dodatków po 2 dniach twardnienia, natomiast w przypadku cementu z popiołem po 28 dniach, z powodu rozwoju reakcji pucolanowej.

W badaniach zastosowano trzy frakcje kruszywa z kopalni Targowica, a mianowicie:

- grube 8/12,8 mm, którym był grys bazaltowy, kategorii G_C 85/20
- grube 5/8 mm, w postaci gysu bazaltowego
- drobne 0/5 mm, także grys bazaltowy, kategorii G_C 85/20

Krzywe uziarnienia tych kruszyw pokazano na rysunku 1 i 2.

Do sporządzenia betonu zastosowano również piasek Rydwan 0/2 mm, o kategorii G_F, którego uziarnienie pokazano na rysunku 3.

Projektowaną krzywą uziarnienia kruszywa pokazano na rysunku 4.

Jako domieszka stosowano Viscocrete 3 firmy Sika, która należy do grupy karboksylanów.

equivalent was below 0,6%.

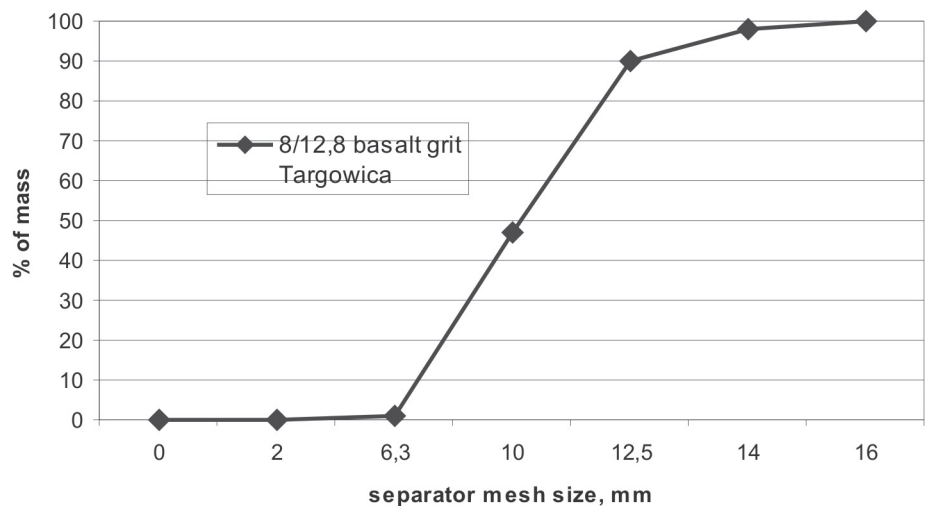
Cement CEM II/B-V was characterized by higher water demand as a consequence of larger surface. On the other hand, it had a lower hydration heat. The strength of both cements was high; higher for cement without additions after 2 days of hardening; for cement with fly ash after 28 days as a consequence of pozzolana reaction development.

Three fractions of aggregates from Targowica quarry were used for tests, i.e.:

- coarse 8/12,8 mm, G_C 85/20 category basalt grit,
- coarse 5/8 mm, in the form of basalt grit
- fine 0/5 mm, G_C 85/20 category basalt grit

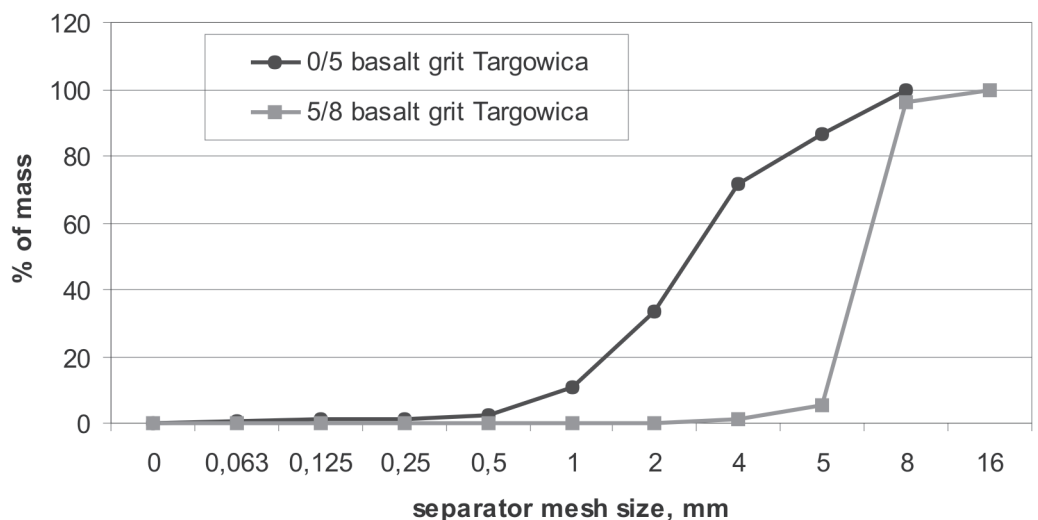
Grain distribution curves for those aggregates are shown in Figures 1 and 2.

Also Rydwan 0/2 mm sand, G_F category, the grain distribution curve for which is shown in Figure 3, was used in manufacture of the concretes.



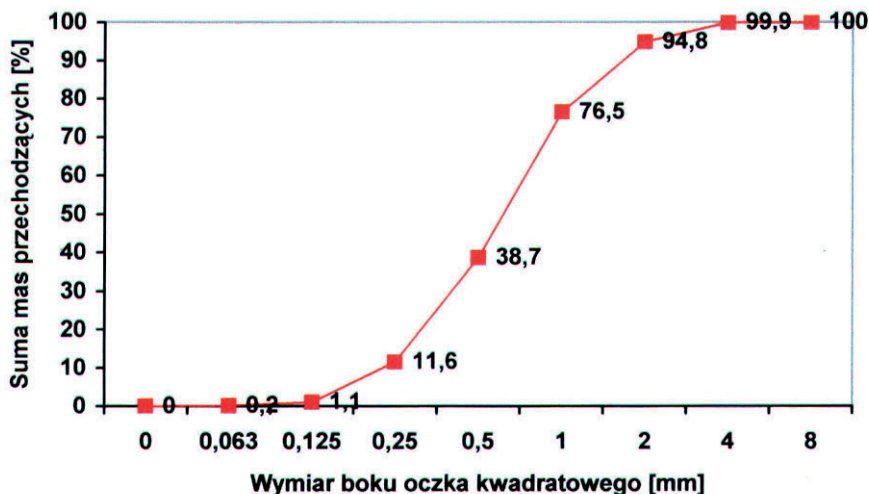
Rys. 1. Krzywa ziarnowa stosowanego kruszywa 8/12,8

Fig. 1. Grain distribution curve for 8/12,8 aggregate



Rys. 2. Krzywe ziarnowe kruszyw bazaltowych

Fig. 2. Grain distribution curves for basalt aggregates

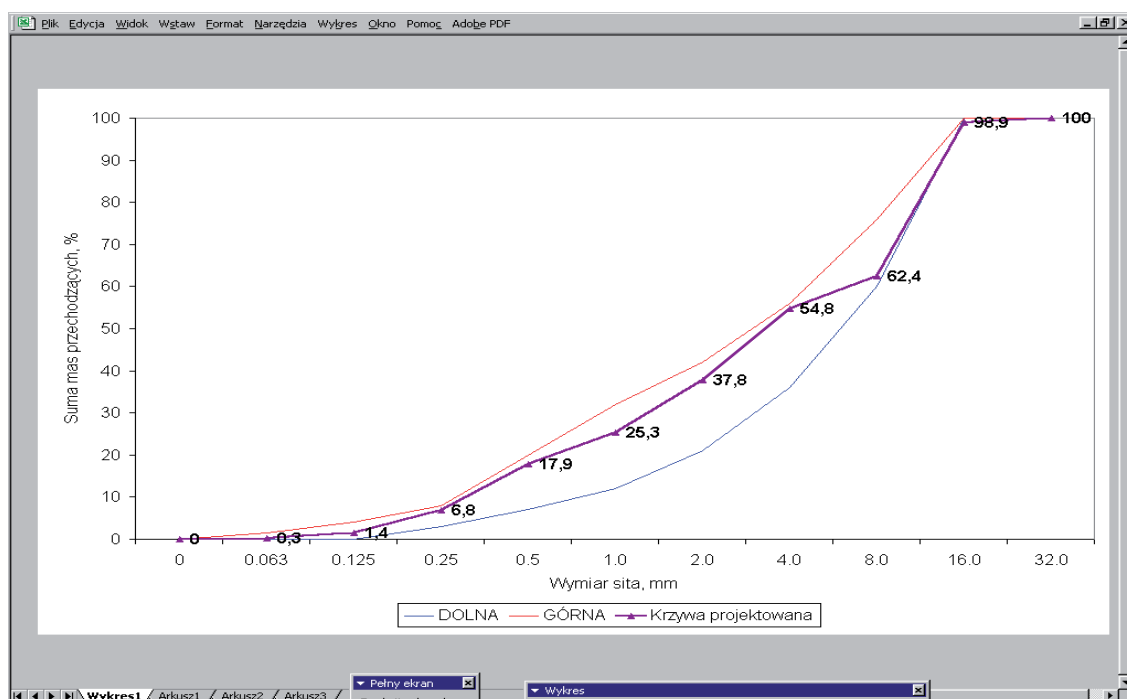


Rys. 3. Krzywa ziarnowa piasku Rydwan

Fig. 3. Rydwan sand grain distribution curve

3. Skład betonów

Zaprojektowano dwa betony z dwóch cementów, przy czym rodzaj i krzywa ziarnowa kruszywa pozostały bez zmian. Skład obu mieszanek betonowych był identyczny. Ze względu na różną wodożądność cementów zastosowano tylko nieznacznie większy dodatek superplastyfikatora, w przypadku betonu 2 z cementu portlandzkiego popiołowego CEMII/B-V. Skład obu betonów podano w tabelicy 2.



Rys. 4. Projektowana krzywa uziarnienia kruszywa

Fig. 4. Designed aggregate grain distribution curve

4. Właściwości betonów

Próbki betonowe sporządzono w ten sposób, że składniki betonu mieszano krótko na sucho, a następnie w mieszarce o pojemności 80 litrów. Z mieszanki zarobiono kostki o wymiarach 15 cm, które przechowywano w wilgotnej komorze, w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i $WV > 90$.

Właściwości mieszanek betonowych podano w tabelicy 3.

Uzyskano betony o bardzo dużej wytrzymałości, która wzrastała i to znacznie, aż do 56 dnia (tabela 4). Wzrost trwał niewątpliwie jeszcze dłużej, na co wskazuje duży przyrost pomiędzy 28 i 56 dniem, lecz nie prowadzono dalszych pomiarów.

Skurcz obu betonów był praktycznie jednakowy i typowy dla tego kompozytu. Wynosił on około 0,1 mm/m po 7 dniach i wzrósł do

The designed aggregate grain distribution curve is shown in Figure 4.

Viscocrete 3 by Sika, that belongs to the group of carboxylanes, was employed as an admixture.

3. Composition of concretes

Two concretes based on two cements were designed; the type and particle size distribution curve of the aggregate were constant. The composition of two concrete mixes was identical. As a consequence of different water demand of two cements a slightly higher addition of superplasticizer was applied in case of concrete 2 of Portland siliceous cement CEMII/B-V. The composition of both concretes is presented in Table 2.

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK W TEMPERATURZE 20°C

CHARACTERISTICS OF CONCRETE MIXES AT 20°C

Właściwość Characteristic	Beton/Concrete 1	Beton/Concrete 2
Opad stożka Cone subsidence Ve-Be, s	5,5	6,5
Zawartość powietrza Air content, %	2,5	2,3
Gęstość / Density, kg/m^3	2,6	2,6

4. Properties of concretes

Samples of concretes were made by short dry mixing of concrete components and next mixing in a 80 liters capacity mixer. The

0,25 mm/m po 56 dniach.

Tablica 4 / Table 4

Zbadano także odporność na mróz obu betonów, przy zastosowaniu dwóch metod: według normy szwedzkiej SS 13 72 44 Test Method for Concrete – Hardened Concrete – Frost Scaling oraz metodą przyspieszoną według starej, już wycofanej, normy polskiej na beton zwykły PN 88/ B-06250.

WYTRZYMAŁOŚĆ BETONÓW
STRENGTH OF CONCRETES

Beton / Concrete	Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength, MPa, po dniach				
	3	7	14	28	56
Beton / Concrete 1	55,4	72,8	85,0	90	97,0
Beton / Concrete 2	61,3	75,3	80,0	86,3	91,7

Badania według ostrej metody szwedzkiej wykazały, że oba betony mają bardzo dobrą odporność na mróz, w obecności soli odladzającej. Cyklem zamrażania i rozmrażania poddano betony, które dojrzewały 21 dni w szafie, w temperaturze $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ i w powietrzu o wilgotności względnej 100%. Po 112 cyklach oba betony nie wykazały żadnych ubytków i w związku z tym mają doskonałą odporność na mróz. Również badania metodą przyspieszoną potwierdziły bardzo dobrą odporność na mróz obu betonów, które wykazały po 300 cyklach minimalny ubytek objętości wynoszący 0,043 i 0,040 cm^3/cm^2 odpowiednio dla betonu 1 i betonu 2. Natomiast graniczna wartość podana w normie wynosi 0,5 cm^3/cm^2 .

Badana nasiąkliwość (norma PN 88/ B-06250) wyniosła 2,77 dla betonu 1 i 2,96 w przypadku betonu 2. Jest to wynik bardzo dobry, który spowodował bardzo dobrą odporność obu betonów na mróz. Również głębokość penetracji wody była bardzo mała i wyniosła 2,3 cm (PN-EN 12390 - 8). Była ona jednakowa dla obu betonów.

Zbadano mikrostrukturę betonów po 28 dniach dojrzewania za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego. Mikrostruktura obu betonów okazała się bardzo prawidłowa. Równocześnie jednak strefa przejściowa matryca cementowa – kruszywo jest bardziej prawidłowo zbudowana w przypadku betonu 2, a więc z cementem portlandzkim popiołowym. Strefę tę pokazano na rysunkach 5 i 6. Widać, że nie ma dobrego wiązania żelu cementowego z ziarnem kruszywa w betonie 1 (rys. 5). Natomiast jest ono znacznie lepsze w betonie 2. Jest to prawdopodobnie wpływ popiołu i znacznie zaawansowanej reakcji pucolanowej. Utworzona w jej wyniku faza C-S-H wypełniła strefę przejściową kruszywo- matryca i zapewniła lepsze wiązanie pomiędzy tymi składnikami betonu. Znalazło to wyraz w większym przyroście wytrzymałości betonu 2 w okresie pomiędzy 14 a 28 dniem twardnienia tablica 4).

5. Dyskusja

Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie obu rodzajów cementów pozwala na uzyskanie BWW o bardzo dobrych właściwościach, do których obok wytrzymałości zaliczyć należy przede wszystkim małą nasiąkliwość i głębokość penetracji wody oraz odporność na mróz. Pomimo mniejszej wytrzymałości po 2 dniach cementu portlandzkiego popiołowego uzyskano beton o bardzo wysokiej wytrzymałości po 3 dniach, przekraczającej

mix was used to prepare 15 cm cubes that were stored in a moist chamber at $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ and WW > 90%.

The characteristics of concrete mixes are given in Table 3.

Concretes of very high strength were obtained. That strength increased significantly up to day 56 (Table 4). The increase

undoubtedly continued even longer, which is indicated by high increase between days 28 and 56, but further measurements were not taken.

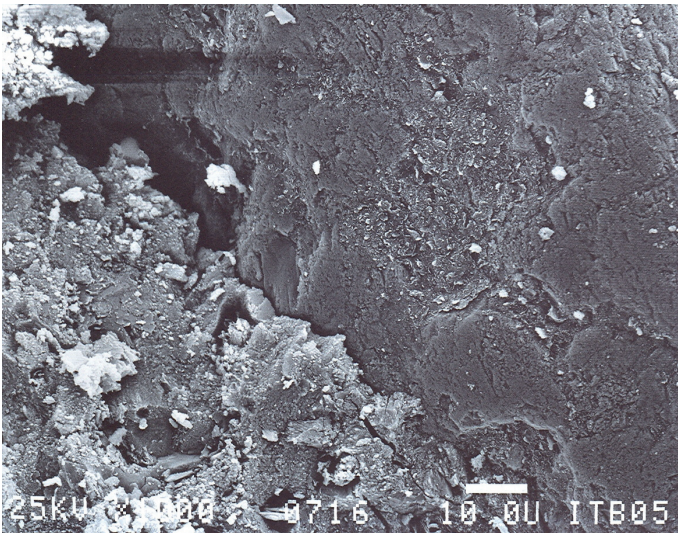
The shrinkage of both concretes was practically identical and typical for this composite at ca. 0,1 mm/m after 7 days and it increased to 0,25 mm/m after 56 days.

The resistance of both concretes to freeze-thaw test was examined applying two methods: according to the Swedish standard SS 13 72 44 Test Method for Concrete – Hardened Concrete – Frost Scaling and the accelerated method according to old, former, Polish standard for ordinary concrete PN 88/ B-06250.

Tests according to the stringent Swedish method showed that both concretes showed very good resistance to frost in the presence of deicing salt. The freeze-thawing cycles were carried on concretes maturing 21 days in a humid chamber at $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ and relative humidity of 100%. After 112 cycles both concretes showed no frost damage, which shows that they have excellent resistance to frost. Also tests using the accelerated method confirmed very good resistance to frost of both concretes which after 300 cycles showed a minimal volume decrease of 0,043 and 0,040 cm^3/cm^2 for concrete 1 and 2 respectively. The limit specified in the standard is 0,5 cm^3/cm^2 .

Tests of water absorbability (standard PN 88/ B-06250) showed 2,77 for concrete 1 and 2,96 for concrete 2. These results are very good and they caused very good resistance of both concretes to frost. Also water penetration depth was very small equal 2,3 cm (PN-EN 12390 - 8). It was identical for both concretes.

Microstructure of concretes was examined after 28 days of curing using a scanning electron microscope. The microstructure of both concretes was typical. At the same time, however, the transition zone between cement matrix and aggregate was more regularly built in case of concrete 2, i.e. Portland siliceous cement. This zone is shown in Figures 5 and 6. In case of concrete 1 it can be seen that there is no good binding between cement gel and aggregate grains (Fig. 5). However it is much better microstructure in concrete 2, which probably results from the influence of fly ash and highly advanced pozzolana reaction. The C-S-H phase developed fills the transition zone between the aggregate and matrix and offered better binding between those concrete components. That was expressed in a higher increase of concrete 2 strength between 14 and 28 days of hardening (Table 4).



Rys. 5. Beton 1 po 28 dniach twardnienia, strefa przejściowa matryca cementowa - kruszywo

Fig. 5. Concrete 1 after 28 days of hardening, transition zone between the cement matrix and aggregate

nawet wytrzymałość betonu 1 z cementu CEM I, o większej aktywności początkowej. Można przypuszczać, że drobniutkie cząstki popiołu wypełniły przestrzenia między grubszymi ziarnami cementu i to zapewniło dobre właściwości betonu 2.

Trzeba podkreślić, że kruszywo bazaltowe o bardzo dobrych właściwościach fizycznych miało również bardzo korzystny wpływ na wytrzymałość uzyskanego betonu. Pozwoliło to na uzyskanie wysokiej klasy BWW, o wytrzymałości znacznie wyższej od granicznych 60 MPa. Aitcin (1) zalicza betony o takiej wytrzymałości do klasy II BWW.

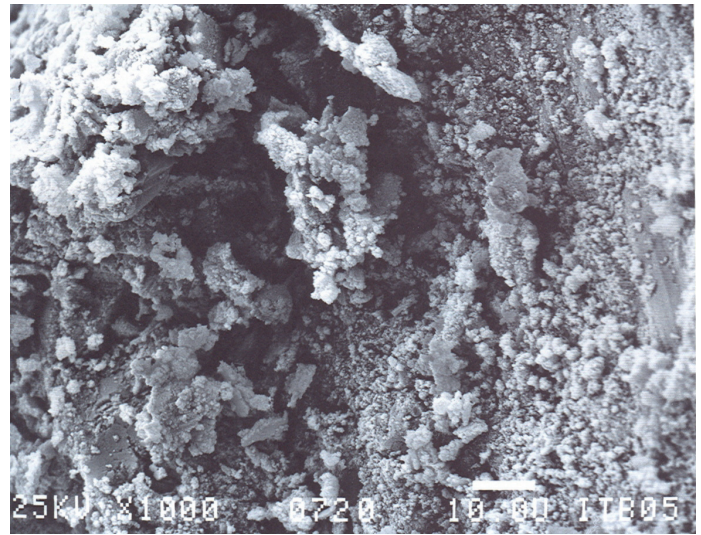
6. Wnioski

Uzyskane wyniki pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Cement portlandzki popiołowy jest w pełni przydatny do wytwarzania BWW,
- BWW uzyskany z cementu CEM II/B-V osiąga nie tylko duże wytrzymałości lecz również bardzo korzystne inne właściwości fizyczne, przede wszystkim nasiąkliwość i mrozoodporność,
- Kruszywo bazaltowe zapewnia betonom WW bardzo dobre właściwości fizyczne.

Literatura / References

1. P.C. Aitcin, *Betons Haute Performance*, Eyrolles, Paris 2001.
2. Y. B. Zaitsev and F. H. Wittmann, *Materiaux et Constructions*, 14, p. 569, (1982).
3. A. M. Neville, *Właściwości Betonu*, Polski Cement, Kraków 2000.
4. A. Grodzicka, *Odporność betonu wysokowartościowego na działanie mrozu*.
5. J. Babińska, K. Starzyk, *Cement Wapno Beton*, 73, p. 36, (2006).



Rys. 6. Beton 2 po 28 dniach twardnienia, strefa przejściowa matryca cementowa kruszywo

Fig. 6. Concrete 2 after 28 days of hardening, transition zone between the cement matrix and aggregate

5. Discussion

The conducted tests showed that application of both cement types allows to obtain HPCs with very good characteristics including, in addition to strength, low absorbability, low water penetration depth and excellent resistance to freeze-thaw tests. Despite lower strength of Portland siliceous cement after 2 days the produced concrete had a very good strength after 3 days, exceeding even the strength of concrete 1 with CEM I which showed higher hydraulic initial activity. It can be assumed that fine fly ash particles filled the spaces between coarser grains of cement and assured good characteristics of concrete 2.

It should be pointed out that basalt aggregate possessing very good physical characteristics also had a highly favorable influence on strength of produced concrete. That allowed to obtain high-class HPCs significantly exceeding the limit strength of 60 MPa. Aitcin (1) grades concretes of that strength to class II HPCs.

6. Conclusions

The results obtained allow drawing the following conclusions:

- Portland siliceous cement is fully suitable for manufacture of HPCs,
- HPC obtained from CEM II/B-V cement shows not only high strength but also highly favorable other physical characteristics, mainly absorbability and resistance to frost,
- Basalt aggregate assured very good physical characteristics of High-Performance Concretes.